

# 贸易视角下广东省水-能源-粮食流通与资源间 压力互馈研究

洪思扬<sup>1</sup>, 程涛<sup>2</sup>, 王佳友<sup>1</sup>, 杨震宇<sup>1</sup>, 林漫婷<sup>1</sup>, 王红瑞<sup>3</sup>

(1. 广东省农业科学院农业经济与信息研究所, 广东 广州 510640; 2. 广东省水利水电科学研究院, 广东 广州 510610; 3. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875)

**摘要:** 基于多尺度投入产出法, 核算了广东省各部门水资源-能源-粮食要素的资源强度, 对贸易视角下水资源、能源、粮食3类资源的压力互馈情况进行量化分析。结果表明: 2007—2017年, 广东省区域经济系统各部门的水资源-能源-粮食资源强度逐年下降, 利用效率逐步提升, 水、粮食强度值较高的部门集中于水的生产和供应业、农业等资源密集型部门, 能源强度值则以矿业、电力及燃气的生产和供应业较高; 各部门吸纳了大量的水资源-能源-粮食资源净流入广东省经济系统, 且主要由制造业进入, 城镇居民消费和省外调出是水资源-能源-粮食的主要最终消费途径; 广东省本地资源使用压力因水资源-能源-粮食资源贸易流通而得到显著改善, 能源贸易缓解了本地84.33%的能源使用压力, 粮食贸易缓解了本地40.13%的粮食使用压力, 粮食贸易对水资源压力的缓解作用达能源贸易的5倍。

**关键词:** 水-能源-粮食; 资源强度; 资源流通; 资源压力; 广东省

**中图分类号:** TV213.4; F121.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-6933(2024)06-0048-10

**Research on water-energy-food circulation and interaction pressure between resources in Guangdong Province from perspective of trade//HONG Siyang<sup>1</sup>, CHENG Tao<sup>2</sup>, WANG Jiayou<sup>1</sup>, YANG Zhenyu<sup>1</sup>, LIN Manting<sup>1</sup>, WANG Hongrui<sup>3</sup>** (1. Institute of Agricultural Economics and Rural Development, Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Guangzhou 510640, China; 2. Guangdong Research Institute of Water Resources and Hydropower, Guangzhou 510610, China; 3. College of Water Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

**Abstract:** With active resource trade in Guangdong Province, the relationship between water, energy, and food consumption is complicated, which makes comprehensive resource management difficult. Therefore, it is necessary to accurately calculate resource utilization efficiency and quantify resource interaction pressure from the perspective of trade. Based on the multi-scale input-output method, this study calculated the resource intensity of water-energy-food in Guangdong Province, quantified the circulation of water-energy-food-related resource elements, and conducted a quantitative analysis of the mutual interplay of water-energy-food resource pressures from the perspective of trade. The results show that, from 2007 to 2017, the water-energy-food resource intensity in all sectors in Guangdong Province gradually decreased, and the utilization efficiency gradually increased. High water and food intensity were concentrated in resource-intensive sectors such as the water production and supply industry and agriculture, while the energy intensity was higher in sectors such as mining, electricity, and gas production and supply. Various sectors absorbed a large amount of water-energy-food resources into the Guangdong economic system, mainly from the manufacturing industry. Urban consumption and out-of-province transfers were the main final consumption outlets for water-energy-food resources. The pressure on local resource use in Guangdong Province has improved significantly because of water-energy-food resource trade circulation. Energy trade has relieved 84.33% of the pressure on local energy use, and food trade had relieved 40.13% of the pressure on food use. The water pressure relief effect of food trade was five times that of energy trade.

**Key words:** water-energy-food; resource intensity; resource circulation; resource pressure; Guangdong Province

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51879010); 中国博士后科学基金面上项目(2023M730738); 广东省基础与应用基础研究基金项目(2024A1515012313); 广东省哲学社会科学规划项目(GD23YYJ14, GD23YYJ15)

**作者简介:** 洪思扬(1990—), 女, 副研究员, 博士, 主要从事水资源系统分析研究。E-mail: hongsy@mail.bnu.edu.cn

**通信作者:** 王红瑞(1963—), 男, 教授, 博士, 主要从事水资源系统分析研究。E-mail: henrywang@bnu.edu.cn

在全球气候变化、城市化、人口集聚等多重因素的影响下,水资源紧缺、能源消费量激增、粮食安全保障形势严峻等问题不断涌现<sup>[1-2]</sup>。水、能源、粮食中任意一类资源供需失衡都将产生不可预估的严重后果<sup>[3]</sup>。从宏观经济系统的视角统筹协调水-能源-粮食资源利用与经济社会发展之间的关系,实现资源高效利用,缓解资源供给压力,关乎经济稳定发展、生态安全和国家安全<sup>[4-5]</sup>,是经济社会高质量发展和生态文明建设的重要挑战<sup>[6]</sup>。

水、能源、粮食 3 类资源可以借助于产品和服务而发生流动。以资源利用的视角考虑,产品和服务的流动可以视为资源的流动,识别资源的流动特征是资源优化配置的重要前提。投入产出分析可以实现资源在经济系统中流通的完整模拟,在水-能源-粮食(water-energy-food, WEF)资源流通研究中得到广泛应用<sup>[7-10]</sup>,涉及世界、国家、省际和城市等不同尺度经济体,计算结果综合反映了资源的直接消耗与间接消耗<sup>[11]</sup>。如,Zhang 等<sup>[12]</sup>基于环境扩展多区域投入产出法,构建了粤港澳跨区域水、能源和粮食足迹核算框架,计算结果可为粤港澳地区 WEF 资源协同管理提供依据。Xiao 等<sup>[13]</sup>运用基于投入产出的供应链分析方法,识别中国经济系统中粮食-水、粮食-能源和能源-水的关联及其流通关系。曹涛等<sup>[14]</sup>基于京津冀多地区投入产出表,核算了虚拟水的流动情况,结果表明,京津冀地区虚拟水呈净流出状态。陈荟荟<sup>[15]</sup>运用多区域投入产出模型构建了中国不同省份间隐含的能源流通网络,寻求隐含能源消耗量和转移量较大的省份,从而发掘节能减排中的重点关注对象。目前,投入产出法在资源流通核算中具备较大优势,但将 WEF 资源及其相互消耗量统一纳入投入产出核算的研究较少。

WEF 资源供需压力通常源于资源生产量和消耗量之间的不平衡,具体表现为资源供需关系和空间分布的不均衡。鉴于资源属性和研究对象的差异,资源压力指数构建及评价方法各不相同,又涉及单一资源压力指标和综合评价指标体系的构建。其中,水资源压力常以水资源压力指数(water stress index, WSI)表征,即研究区内取水量与本地可更新水资源量的比值,用以评价地区的水资源压力程度<sup>[16-17]</sup>。能源压力 and 安全性评估在计算赫芬达尔-赫希曼指数(Hirschman-Herfindahl index, HHI)及香农-维纳多样性指数(Shannon-Wiener's diversity index, SWI)<sup>[18]</sup>的基础上,构建能源安全模型并识别能源压力状态。粮食自给率是粮食生产量和粮食消费量的比值,其变化率在一定程度上反映了粮食的供需风险,较高的自给率对应较高的粮食安全水平

和较低程度的压力<sup>[19]</sup>。WEF 综合资源压力与安全评估中,已有研究多借助压力-状态-响应(pressure-state-response, PSR)模型<sup>[20]</sup>、系统动力学分析<sup>[21]</sup>、SBM-DEA 模型<sup>[22]</sup>等手段实现。例如:王红瑞等<sup>[23]</sup>通过构建水-能源-粮食综合资源压力指数,分析了长江经济带 WEF 资源压力变化特征,结果表明,WEF 系统资源压力呈逐年递增的趋势;张中浩等<sup>[24]</sup>分析了长江三角洲地区 1990—2018 年间城镇化对 WEF 系统压力的影响,结果表明人口集聚、城市空间拓展、消费水平提升等显著增加了地区的 WEF 资源压力;Deng 等<sup>[25]</sup>通过构建 WEF 资源压力指数,对快速城市化背景下的环渤海城市群 WEF 系统压力进行量化,进一步分析了城市化指标与 WEF 系统压力之间的相关性;白景锋等<sup>[26]</sup>通过矢量合成法构建 WEF 系统压力指数,并运用地理加权回归模型对中国 WEF 系统压力的变化因素进行了分解分析。综合来看,已有研究主要通过构建 WEF 综合压力指数的方式量化经济系统中的 WEF 系统压力水平,而考虑贸易视角下水资源、能源、粮食 3 类资源间压力互馈的研究相对较少。3 类资源之间的相互消耗量和供需矛盾均可通过产业链被进一步放大或缩小,综合考虑 WEF 内在关联开展资源压力研究,可以为资源风险防控和优化利用提供科学指导。

广东省是我国开放程度最高,经济活力最强的区域之一。随着国家大力推进粤港澳大湾区建设,人口和产业进一步集聚,对水、能源和粮食形成了更大的需求和依赖。广东省水资源总量丰沛,但时空分布不均,人均水资源量不足世界人均水平的 1/3,水资源自给率低、内河水系水环境污染、咸潮上溯等问题长期存在,水资源短缺问题严峻<sup>[27]</sup>。近年来,广东省在低碳转型、绿色复苏、产业升级等方面取得了重要进展,但仍存在能源自给率低、结构不完善、利用效率低等问题<sup>[28]</sup>,化石能源在能源消费结构中占比仍然较高,可达七成,实现“双碳”目标压力大、任务重,地区整体能源消费总量控制难度大,能源消费强度高。粮食方面,广东省土地细碎化严重,人均耕地面积仅 0.027 hm<sup>2</sup>,不足全国人均水平的 1/3,粮食缺口量超 4000 万 t,自给率不足三成。面对突变的国内外局势,广东省农业资源自给率低、供需结构失衡、农产品出口国价格垄断等均对粮食安全形成了严重制约。整体而言,广东省 WEF 资源利用效率较低,对外依存度高,供需矛盾日益尖锐,资源协同管理难度较大。通过资源贸易,广东省在一定程度上将自身的资源使用压力转移至外部地区,同时,水资源、能源、粮食 3 类资源间的复杂交织关系进一步加剧了资源管理难度。基于此,本文在核算广东

省水资源、能源、粮食 3 类资源利用效率的基础上,量化经济系统中 WEF 资源的流通过程;基于资源流通实际,对贸易视角下 3 类资源之间的流通特征和相互作用压力进行量化,以揭示潜在的资源风险和挑战,为决策者制定资源管理策略提供科学依据。

## 1 研究方法 with 数据来源

### 1.1 研究方法

#### 1.1.1 资源利用效率核算

国民经济系统中各部门对资源的使用效率存在差异,通常以万元产值资源消耗量表征资源的利用效率,反映单位产值产品或服务对资源的直接和间接消耗量,即资源强度。本文选用多尺度投入产出法,量化广东省国民经济系统中各部门水资源、能源、粮食的资源强度,以及能耗水、粮耗水、水耗能、粮耗能、能耗粮 5 类资源的强度,参考洪思扬等<sup>[29]</sup>的研究,求得部门的资源强度。以广东省部门  $i$  为例,存在如下流通关系:

$$R_i + \sum_{j=1}^n \varepsilon_{1,j} z_{1,ji} + \sum_{j=1}^n \varepsilon_{d,j} z_{d,ji} + \sum_{j=1}^n \varepsilon_{m,j} z_{m,ji} = \varepsilon_{1,i} \left( \sum_{j=1}^n z_{1,ij} + y_{1,i} + e_{ld,i} + e_{lm,i} \right) \quad (1)$$

式中: $R_i$  为部门  $i$  的资源直接使用量; $\varepsilon_{1,j}$ 、 $\varepsilon_{d,j}$ 、 $\varepsilon_{m,j}$  分别为本地、研究区之外的省份和中国之外的国家部门  $j$  的资源强度; $\varepsilon_{1,i}$  为部门  $i$  的资源强度,区分了本地使用、省外调入和国外进口产品的资源强度; $z_{1,ji}$ 、 $z_{d,ji}$ 、 $z_{m,ji}$  分别为本地其他部门、其他省份和其他国家的部门  $j$  对研究区内部门  $i$  的中间投入; $z_{1,ij}$  为研究部门  $i$  对部门  $j$  的中间投入量; $y_{1,i}$  为部门  $i$  的最终消费量; $e_{ld,i}$ 、 $e_{lm,i}$  分别为部门  $i$  的调出量和出口量。在式(1)的基础上,可以得到部门  $i$  的资源强度  $\varepsilon_1$ :

$$\varepsilon_1 = (\mathbf{R} + \varepsilon_d \mathbf{Z}_d + \varepsilon_m \mathbf{Z}_m) (\mathbf{X}_1)^{-1} (\mathbf{I} - \mathbf{A}_1)^{-1} \quad (2)$$

其中  $\mathbf{R} = (R_{i,j})_{m \times n}$      $\varepsilon_1 = (\varepsilon_{1,j})_{m \times n}$   
 $\varepsilon_d = (\varepsilon_{d,j})_{m \times n}$      $\varepsilon_m = (\varepsilon_{m,j})_{m \times n}$      $\mathbf{Z}_d = (z_{d,ji})_{n \times n}$   
 $\mathbf{Z}_m = (z_{m,ji})_{n \times n}$      $\mathbf{X}_1 = (x_{1,ij})_{n \times n}$   
 $\mathbf{A}_1 = \mathbf{Z}_1 (\mathbf{X}_1)^{-1}$      $\mathbf{Z}_1 = (z_{1,ji})_{n \times n}$

式中: $\mathbf{X}_1$  为总产出矩阵; $(\mathbf{I} - \mathbf{A}_1)^{-1}$  为列昂捷夫逆矩阵。

#### 1.1.2 WEF 资源流动核算

水、能源、粮食 3 类资源可以借助于产品和服务而流通于各地区、各部门之间。广东省与中国其他省份及国家之间均有贸易往来。对于部门  $i$  而言,与其输入端相关的项目包括资源的直接开采、省外调入和国外进口;与输出端相关的项目包括资源的本地最终消费、省外调出和国外出口,统称为最终使

用,其中,最终消费包括农村生活消费、城镇生活消费、政府消费、固定资本形成、存货增加 5 项。由物质平衡规律可知,资源的各项来源之和等于最终使用量,最终使用各项的资源量分别通过资源强度与各项经济量相乘获得。值得注意的是,对于广东省而言,WEF 资源的净流入量在数值上等于 WEF 的省外调入量与国外进口量之和减去省外调出量和国外出口量,即  $\sum_{j=1}^n \varepsilon_{d,j} z_{d,ji} + \sum_{j=1}^n \varepsilon_{m,j} z_{m,ji} - \varepsilon_{1,i} e_{ld,i} - \varepsilon_{1,i} e_{lm,i}$ 。

#### 1.1.3 WEF 资源压力互馈核算

资源借助于产品和服务而流通于不同的地区和部门之间,使得资源的原始空间分布发生改变,也对本地资源造成了一定的压力。表 1 为 WEF 资源压力评价指标。

### 1.2 数据来源

投入产出数据来源于广东省统计局,包含 2007 年、2012 年和 2017 年投入产出表;水资源数据来源于广东省 2007 年、2012 年和 2017 年水资源公报,包括农业、工业、生活、生态用水 4 类;能源数据来源于 2008 年、2013 年和 2018 年广东省能源统计年鉴,包括原煤、原油、天然气、水电、核电、风电 6 类一次能源生产量;粮食数据来源于 2008 年、2013 年和 2018 年广东省统计年鉴,包括水稻、小麦、玉米、大豆 4 类粮食作物生产量。水、能源、粮食 3 类资源相互消耗方面,能源耗水核算原煤、原油、天然气、水电、核电、风电 6 类一次能源生产加工过程中的直接用水量<sup>[30-31]</sup>;粮食耗水核算水稻、小麦、玉米、大豆的生产水足迹<sup>[32]</sup>。水耗能源核算农业、工业、生活、生态用水的社会水循环能耗<sup>[31]</sup>;粮食耗能核算各类主要粮食作物生产加工中使用的农药、化肥和农膜,以及农机设备消耗的化石燃料<sup>[33]</sup>。能源耗粮核算作物秸秆、林木薪柴和畜禽粪便的生物质能量<sup>[34]</sup>。

## 2 结果分析

### 2.1 广东省 WEF 相关资源要素强度

为探究广东省各部门 WEF 资源利用效率变化趋势,按照行业属性,将广东省投入产出表中的 42 个部门以产值为权重合并为七大类,分别为农业(S1)、矿业(S2)、制造业(S3)、电力及燃气的生产和供应业(S4)、水的生产和供应业(S5)、建筑业(S6)和服务及运输业(S7),图 1 为 2007 年、2012 年、2017 年各部门 WEF 相关资源要素强度。

由图 1 可以看出,各类资源要素强度均在研究时间段内呈现下降趋势,说明广东省经济系统各部门对 WEF 资源的利用效率均有所提升。水资源、能

表 1 WEF 资源压力评价指标

Table 1 WEF resource pressure evaluation index

压力指数	符号	计算公式	变量含义
水资源 压力 指数	$W_{S1}$	$W_{S1} = \frac{W_d}{W_r}$	$W_{S1}$ 为水资源开采量对本地用水造成的压力; $W_d$ 为水资源直接开采量; $W_r$ 为可更新水资源量 <sup>[35]</sup>
	$W_{S1}^*$	$W_{S1}^* = \frac{W_d + W_{ni}}{W_r} = \frac{W_d + W_{ni,d} + W_{ni,f}}{W_r}$	$W_{S1}^*$ 为假定从外部调入的水资源由本地提供时,地区对应的水资源压力; $W_{ni}$ 为水资源的净流入量; $W_{ni,d}$ 、 $W_{ni,f}$ 分别为国内和国际水资源贸易引发的水资源净流入量
	$W_{S1,e}$	$W_{S1,e} = \frac{W_{eni}}{W_r} = \frac{W_{eni,d} + W_{eni,f}}{W_r}$	$W_{S1,e}$ 为能源贸易引发的水资源压力指数变化; $W_{eni}$ 为能源耗水的净流入量; $W_{eni,d}$ 、 $W_{eni,f}$ 分别为国内和国际能源贸易引发的水资源净流入量
	$W_{S1,f}$	$W_{S1,f} = \frac{W_{fni}}{W_r} = \frac{W_{fni,d} + W_{fni,f}}{W_r}$	$W_{S1,f}$ 为粮食贸易引发的水资源压力指数变化; $W_{fni}$ 为粮食耗水的净流入量; $W_{fni,d}$ 、 $W_{fni,f}$ 分别为国内和国际粮食贸易引发的水资源净流入量
能源 压力 指数	$E_{S1}$	$E_{S1} = \frac{E_c}{E_d}$	$E_{S1}$ 为能源使用对本地能源造成的压力; $E_c$ 为本地开采且由本地直接消费的能源量; $E_d$ 为能源开采量
	$E_{S1}^*$	$E_{S1}^* = \frac{E_c + E_{ni}}{E_d} = \frac{E_c + E_{ni,d} + E_{ni,f}}{E_d}$	$E_{S1}^*$ 为假定从外部调入的能源是由本地提供时,地区对应的能源压力; $E_{ni}$ 为能源的净流入量; $E_{ni,d}$ 、 $E_{ni,f}$ 分别为国内和国际能源贸易引发的能源净流入量
	$E_{S1,w}$	$E_{S1,w} = \frac{E_{wni}}{E_d} = \frac{E_{wni,d} + E_{wni,f}}{E_d}$	$E_{S1,w}$ 为水资源贸易引发的能源压力指数变化; $E_{wni}$ 为水耗能源的净流入量; $E_{wni,d}$ 、 $E_{wni,f}$ 分别为国内和国际水资源贸易引发的能源净流入量
	$E_{S1,f}$	$E_{S1,f} = \frac{E_{fni}}{E_d} = \frac{E_{fni,d} + E_{fni,f}}{E_d}$	$E_{S1,f}$ 为粮食贸易引发的能源压力指数变化; $E_{fni}$ 为粮食耗能的净流入量; $E_{fni,d}$ 、 $E_{fni,f}$ 分别为国内和国际粮食贸易引发的能源净流入量
粮食 压力 指数	$F_{S1}$	$F_{S1} = \frac{F_d - F_c}{F_d}$	$F_{S1}$ 为粮食缺口率,反映粮食消耗对本地粮食生产造成的压力; $F_d$ 为粮食消费需求; $F_c$ 为粮食供给能力
	$F_{S1}^*$	$F_{S1}^* = \frac{F_d - F_c + F_{ni}}{F_d} = \frac{F_d - F_c + F_{ni,d} + F_{ni,f}}{F_d}$	$F_{S1}^*$ 为假定从外部调入的粮食是由本地提供时,地区对应的粮食生产压力; $F_{ni}$ 为粮食的净流入量; $F_{ni,d}$ 、 $F_{ni,f}$ 分别为国内和国际粮食贸易引发的粮食净流入量
	$F_{S1,e}$	$F_{S1,e} = \frac{F_{eni}}{F_d} = \frac{F_{eni,d} + F_{eni,f}}{F_d}$	$F_{S1,e}$ 为能源贸易引发的粮食压力指数变化; $F_{eni}$ 为能源耗粮的净流入量; $F_{eni,d}$ 、 $F_{eni,f}$ 分别为国内和国际能源贸易引发的粮食净流入量

源、粮食全行业平均水平资源强度的年均下降率分别为 7.98%、8.11%和 8.23%。

a. 水资源方面,如图 1(a)所示,S5 的水资源强度显著高于其他部门,且呈显著的下降趋势,数值由 2007 年的 3 573.12 m<sup>3</sup>/万元下降至 2017 年的 1 394.39 m<sup>3</sup>/万元,为广东省的生产和生活用水提供了基本保障;S1 的水资源强度次之,2017 年为 290.23 m<sup>3</sup>/万元,下降趋势同样显著,说明作物灌溉和农村牲畜用水效率有所提升;相比于以上两个水资源密集型产业,其余部门的水资源强度相对较低,以 S7 数值最低,2017 年,广东省第三产业占比达 52.8%,产业结构和用水结构均较为合理。

b. 能源方面,如图 1(b)所示,S2 和 S4 的能源强度显著高于其他部门。S2 作为一次性能源开采部门,数值体现出直接使用的部分较高,S4 则消耗了大量的能源密集型产品,为生产、生活提供了基础保障,以上两部门 2017 年的能源强度分别为 68.01 和 59.87 GJ/万元,后者在研究期内的年均下降率达到 8.11%。

c. 粮食方面,如图 1(c)所示,S1 的资源强度显

著高于其他部门,由 2007 年的 0.40 t/万元下降至 2017 年的 0.17 t/万元;包含食品和烟草在内的 S3 的强度值次之,其余几个部门的强度值则相对均衡。可以看出,相比于能源,水资源和粮食强度较高的部门更集中于资源密集型部门,且不同部门间的差异较大,能源强度的部门间差异相对较小,在一定程度上反映出相比于水资源和粮食,能源借助于产品和服务经济系统,部门间发生的流动更加频繁,能源产品的贸易流通属性更强。

对于水、能源、粮食 3 类资源的相互消耗量,如图 1(d)~(h)所示,能耗水强度与能源强度的部门分布特征相似,粮耗水、粮耗能、能耗粮强度与粮食强度的部门分布特征相似,水耗能强度则与水资源强度部门分布特征相似。S1 的粮耗能强度较高,3 年平均值为 1.75 GJ/万元,体现于粮食种植中农药、化肥和电力的使用;S1 的能耗粮强度同样较高,3 年平均值为 1.58 GJ/万元,主要源于农作物生产中生物质能源的供给。

近年来,广东省的用水结构持续优化,用水效率明显提高,万元产值直接用水量、万元工业增加值用

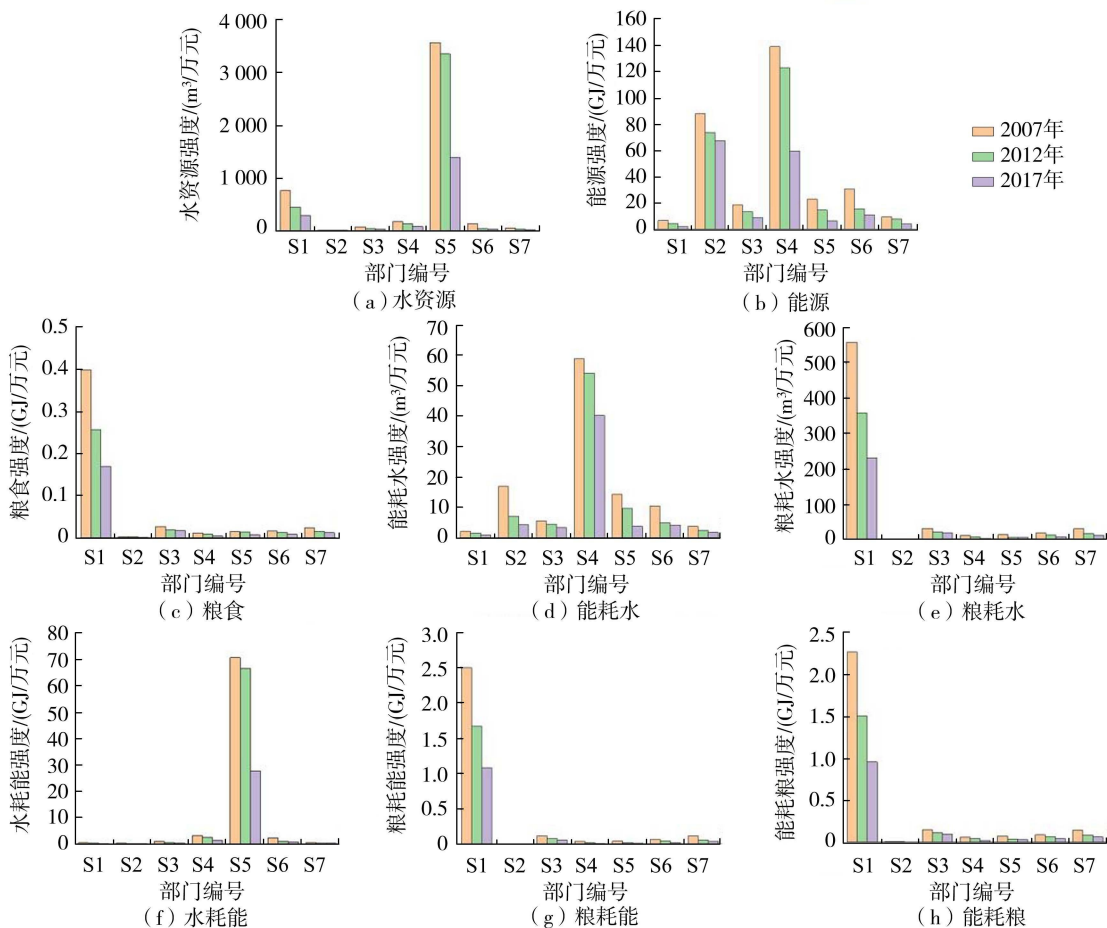


图1 广东省各部门 WEF 相关资源要素强度

Fig. 1 WEF-related resource intensity in various sectors of Guangdong Province

水量、农田灌溉有效利用系数等持续提升,一些高耗水、低产值的企业被淘汰或转型升级,再加上节水新技术的应用,使得用水效率不断提高。作为中国的经济大省,广东省的能源结构正在逐步向清洁、低碳的方向转变。以煤炭为主的能源消费结构正在被逐步打破,风电、太阳能等可再生能源持续发展,分布式能源系统和智能微电网技术不断推广,这些举措为广东省能源绿色发展提供了有力支撑。近年来,广东省逐步加强粮食安全监管和预警体系的建设,同时加强耕地保护和修复,推广先进的农业技术和装备,发展新型农业经营主体和农业社会化服务体系等,粮食综合利用效率得以有效提升。

## 2.2 广东省 WEF 资源流动特征

图2为2017年广东省 WEF 资源在经济系统中流动的完整过程,从源与汇的视角对 WEF 资源的流动进行量化。第1列为水资源的来源,第2列为 WEF 中某一类资源的详细分类,第3列为对应经济系统中的七大行业部门,第4列则为 WEF 资源的最终使用去向。

**a.** 水资源流通过程(图2(a))。第1列中,水资源的直接使用量为 433.53 亿  $m^3$ ,占包含省外调

入和国外进口在内总量的 51.90%。第1列与第2列之间的连接代表资源类别与不同来源的归属关系,其中,农业用水占据主导地位,为 361.26 亿  $m^3$ ,占总用水量的 46.84%,而统计年鉴中的农业直接用水量占总用水量的比例高于这一数字,两者之差代表了隐含于国内和国际贸易之中的间接用水量。第2列与第3列之间的连接代表各类用水进入国民经济系统的方式,其中,77.56%的农业用水、89.79%的工业用水和 40.31%的生活用水分别流入了农业、制造业及水的生产和供应业3个部门。电力及燃气的生产和供应业是最大的工业用水户。第3列和第4列之间的连接则代表水资源的最终使用去向,可以看出,广东省的农村居民消费、城镇居民消费和省外调出的水资源量远高于其他几类最终消费项。

**b.** 能源流通过程(图2(b))。第1列中,不同来源能源消费量总计  $1.60 \times 10^{19} J$ ,其中,省外调入部分的比例(72.09%)显著高于直接使用(11.32%)和国外进口(16.59%)部分,说明省际能源贸易在广东省能源消费中占据主导地位。第2列中,原煤占有绝对的统治地位,占能源总量的 71.39%,远高

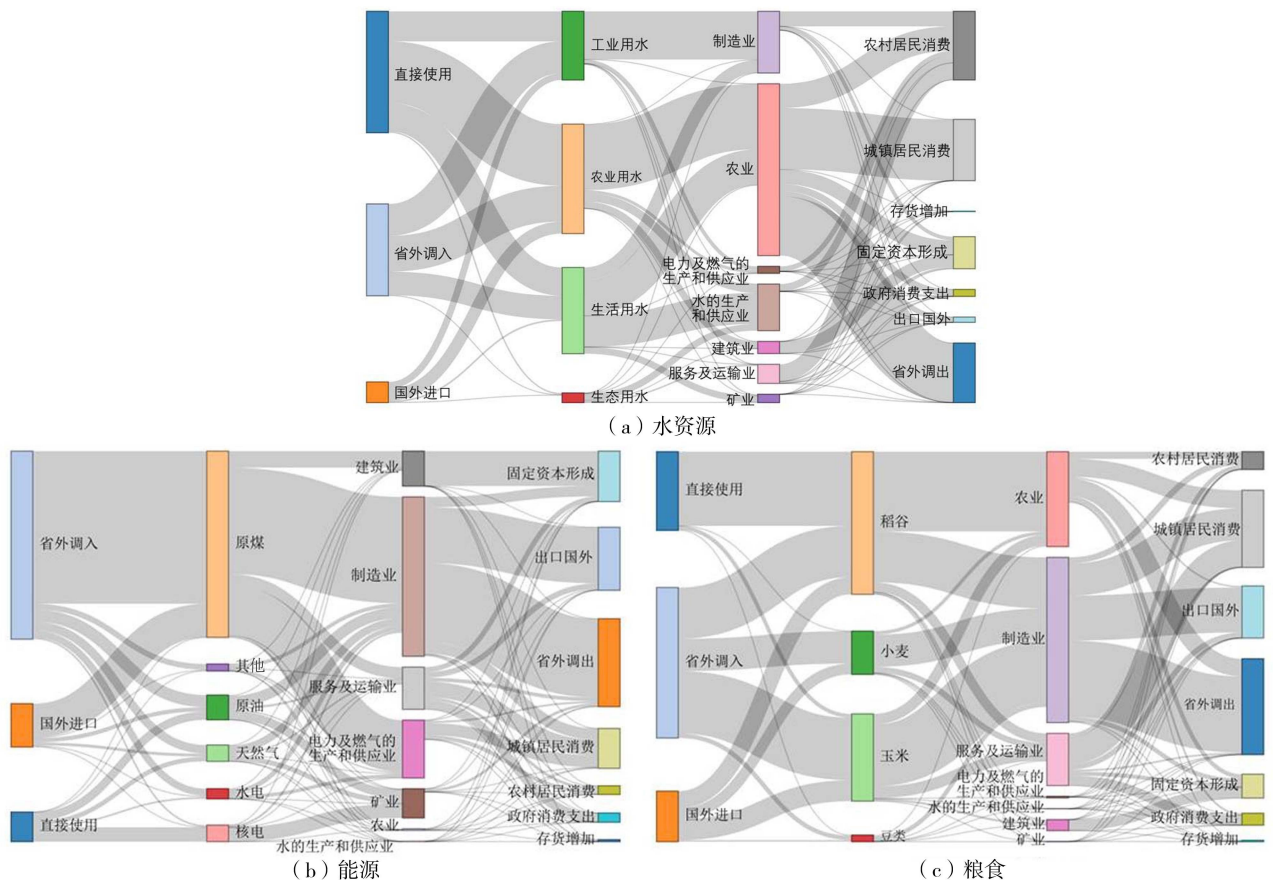


图 2 2017 年广东省 WEF 在经济系统中流动过程

Fig. 2 Source-sink map of water resources in Guangdong Province in 2017

于直接开采量中原煤占总开采量的比例,原油和天然气占能源总量的比例分别为 13.27% 和 6.25%, 同样高于其直接开采量对应的比例 (28.52% 和 15.83%), 以上差异源于能源的外部输入。广东省经济的快速发展需要大量能源的支撑,石油、天然气的外部输入量逐渐增加。2017 年,广东省原油和天然气的对外依存度已超过国际社会认可的 50% 阈值。由此可见,在考虑国际能源贸易安全性时,除了考虑实体能源,进一步探讨间接能源的依赖性也十分必要,换言之,在能源综合管控中,需要将直接使用与最终需求综合考虑。第 3 列中的制造业、矿业、电力及燃气的生产和供应业是能源的主要消费者,制造业的能耗在原煤、原油和天然气几类能源中均有体现,矿业、电力及燃气的生产和供应业则主要体现于原煤的使用,从侧面反映了火力发电在总发电中的核心地位。第 4 列中,能源的最终使用方式以省外调出、国外出口和城镇居民消费为主。

**c. 粮食流通过程(图 2(c))。**粮食来源方面,省外调入和国外进口两部分比例之和为 71.87%, 直接使用部分仅为 28.13%。可以看出,广东省粮食消费主要依赖外部输入,直接生产部分所占份额较小,粮食对外依存度较大。第 2 列中,稻谷和玉米

所占比例较大,分别为 51.01% 和 31.20%, 其余两个粮食作物的比例仅为 17.79%。第 2 列与第 3 列之间的流量代表各类粮食作物进入国民经济系统的方式,其中,绝大部分的稻谷由农业进入社会经济系统,而玉米和小麦则主要由制造业进入社会经济系统,两者的比例分别为 74.41% 和 71.12%。制造业和农业是粮食的主要吸纳部门,消耗了大部分的粮食。第 4 列的粮食最终使用去向中,城镇居民消费和省外调出的粮食量远高于其他几类,此外,国外出口部分也占有相当比例。广东省的省际贸易和国际贸易频繁,因此,随贸易而发生流动的粮食资源量也相对较高。

广东省经济系统各部门的 WEF 相关资源要素以净流入为主。水资源方面,如图 3(a) 所示,年均净流入量为 280.48 亿  $m^3$ , 其中 S3 的净流入量最大,多年平均值为 203.54 亿  $m^3$ , 占净流入总量的七成以上。广东省制造业产值占全行业总产值的五成以上,制造业包含金属冶炼和压延加工业、电气机械和器材等众多资源密集型产业,汇集了大量由外省流入的水资源密集型产品或服务,缓解了地区用水压力。能源方面,如图 3(b) 所示,能源净流入量由 2007 年的  $6.57 \times 10^{18} J$  增长至 2017 年的  $7.71 \times$

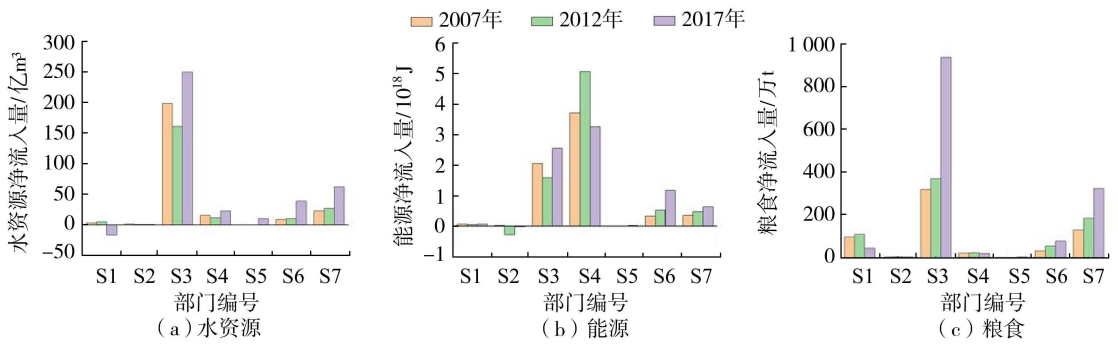


图3 广东省各部门 WEF 资源要素净流入量

Fig. 3 Net inflows of WEF resources by sector in Guangdong Province

$10^{18}J$ ,年平均净流入量为  $7.25 \times 10^{18}J$ 。各部门中,S3和S4的净流入量显著高于其他部门,多年均值分别为  $2.07 \times 10^{18}J$  和  $4.03 \times 10^{18}J$ ,能源分别以制成品和实体能源的形式由外部输入。粮食方面,如图3(c)所示,研究期间粮食净流入量显著增加,由2007年的601.47万t增长至2017年的1407.25万t,年平均净流入量为916.90万t,年增长率为8.87%,各部门中,相比于实体粮食的调入引发的粮食净流入量,S3隐含的粮食净流入量更大,2017年净流入量达938.58万t,是同年S1流入量的21倍,包含食品和烟草业,纺织、服装、鞋帽、皮革、羽绒及其制品在内的制造业均为粮食密集型产业。

综合看来,贸易引发的广东省水、能源、粮食3类资源的净流入量均较大,能源及粮食的净流入量均超过本地资源的生产量,WEF贸易活跃,且主要由制造业流入广东省社会经济系统,资源可蕴含于原产品、中间品和最终消费品之中,资源流通呈现由外部流向广东省的集聚状态,WEF资源贸易在较大程度上缓解了广东省 WEF 资源的供需矛盾。

### 2.3 广东省 WEF 资源压力互馈情况量化

为进一步量化贸易视角下 WEF 资源压力变化及各类资源压力的互馈影响,对表1的压力评价指

标进行逐一核算,结果如表2所示。

由表2可见,对于水资源压力指数而言,各年度的  $W_{SI}^*$  指数显著高于  $W_{SI}$  指数,说明当假定外部流入的水资源是由本地提供时,地区所产生的资源压力高于本地实际水平,即贸易均对广东省本地水资源使用压力起到缓解作用。 $W_{ni,d}$  对应的国内水资源贸易产生的资源压力高于  $W_{ni,f}$  对应的国际水资源贸易产生的资源压力,说明省际水资源贸易产生的水资源压力缓解作用强于国际水资源贸易,这与省际贸易比国际贸易更为活跃的事实相符,且国际贸易的水资源压力缓解作用呈下降趋势。对比发现,粮食贸易对广东省水资源压力的缓解作用显著强于能源贸易的缓解作用,且研究期间缓解作用有所增强。以2017年为例,广东省  $W_{SI}$  指数为0.2426,代表广东省实际的水资源压力水平, $W_{SI}^*$  指数为0.4499,代表假定随产品及服务调入的水资源均由广东省本地提供时地区面临的水资源压力,两指数的差值0.2073即代表贸易对水资源压力产生的缓解作用,其中省际贸易和国际贸易分别缓解了0.1675( $W_{ni,d}$ )和0.0398( $W_{ni,f}$ )个单位的水资源压力。能源贸易引发的水资源压力变化为0.0151( $W_{SI,e}$ ),代表能源的流入缓解了广东省0.0151个单位的水资源压力,占水资源缓解压力缓解水平的

表2 WEF 资源压力评价指数核算结果

Table 2 Check of WEF resource pressure evaluation index

年份	$W_{SI}$	$W_{SI}^*$	$W_{ni,d}$	$W_{ni,f}$	$W_{SI,e}$	$W_{ni,d}$	$W_{ni,f}$	$W_{SI,f}$	$W_{fni,d}$
2007	0.2925	0.4524	0.0963	0.0636	0.0079	0.0082	0.0003	0.0394	0.0394
2012	0.2226	0.3303	0.0532	0.0545	0.0070	0.0070	0.0000	0.0368	0.0193
2017	0.2426	0.4499	0.1675	0.0398	0.0151	0.0166	-0.0015	0.0782	0.0681
年份	$W_{fni,f}$	$E_{SI}$	$E_{SI}^*$	$E_{ni,d}$	$E_{ni,f}$	$E_{SI,w}$	$E_{wni,d}$	$E_{wni,f}$	$E_{SI,f}$
2007	0.0000	0.9928	7.3207	6.1829	0.1450	0.0387	0.0782	-0.0395	0.0172
2012	0.0175	0.9997	6.4888	4.8555	0.6335	-0.0100	0.0338	-0.0438	0.0151
2017	0.0101	0.9390	5.2092	4.2928	-0.0227	0.1039	0.1408	-0.0369	0.0161
年份	$E_{fni,d}$	$E_{fni,f}$	$F_{SI}$	$F_{SI}^*$	$F_{ni,d}$	$F_{ni,f}$	$F_{SI,e}$	$F_{eni,d}$	$F_{eni,f}$
2007	0.0192	-0.0020	0.2922	0.4290	0.1294	0.0074	0.0008	0.0008	0.0000
2012	0.0078	0.0073	0.2839	0.4348	0.0776	0.0733	0.0009	0.0005	0.0004
2017	0.0149	0.0012	0.2756	0.5965	0.2731	0.0478	0.0019	0.0016	0.0003

7.28%,其中, $W_{eni,d}$ 和 $W_{eni,f}$ 分别为0.0166和-0.0015,代表省际能源贸易缓解了广东省0.0166个单位的水资源压力,国际能源贸易则增加了0.0015个单位的水资源压力。粮食贸易引发的水资源压力变化为0.0782( $W_{sl,f}$ ),代表粮食的流入缓解了广东省0.0782个单位的水资源压力,为能源贸易缓解能力的5.18倍,其中,省际粮食贸易和国际粮食贸易分别缓解了0.0681( $W_{mi,d}$ )和0.0101( $W_{mi,f}$ )个单位的水资源压力。

能源压力指数和粮食压力指数的分析方法与水资源压力指数类似。整体上看,对于能源压力指数, $E_{sl}^*$ 显著高于 $E_{sl}$ ,其中又以 $E_{ni,d}$ 贡献较大,说明省际能源贸易较大程度地缓解了广东省的能源压力。相比之下,水资源和粮食贸易对广东省能源压力的缓解作用相对较低,其中,国际水资源贸易甚至加重了广东省的能源压力。对于粮食压力指数,粮食贸易同样在较大程度上缓解了广东省的粮食使用压力,相比之下,鉴于生物质能源的普及程度相对较低,能源贸易对于粮食压力的缓解作用仍旧比较微弱。

综合来看,水、能源、粮食贸易均对广东省本地WEF资源使用压力起到缓解作用。3类资源中,能源的 $E_{sl}^*$ 与 $E_{sl}$ 指数相差最大,3个研究年份分别缓解了本地86.44%、84.59%和81.97%的能源使用压力,表明相比于水资源和粮食,能源贸易对于本地能源压力的缓解作用最强;粮食的 $F_{sl}^*$ 与 $F_{sl}$ 指数差值逐年增大,表明粮食贸易对粮食压力的缓解作用逐年增强,3个研究年份分别缓解了本地31.89%、34.71%和53.80%的粮食使用压力,这与广东省粮食消费量的逐年激增及自给率逐年下降的事实相符。WEF资源的贸易属性存在显著差异,除了少量的跨区域调水,大规模远距离或地区间的实体水贸易非常少,而实体能源和粮食贸易则可能发生在不同地区之间,因此能源和粮食贸易更为活跃,对WEF资源紧缺的广东省资源压力缓解作用更强。WEF相互消耗方面,粮食贸易对广东省水资源压力的缓解作用显著强于能源贸易,前者的作用效果可达后者的5倍,且研究时段内作用程度有所增强;水资源和粮食贸易对广东省能源压力的缓解作用相对较低,能源贸易对于粮食压力的缓解作用微乎其微。粮耗水和能耗水在广东省WEF纽带关系中具有核心地位,是缓解WEF资源压力、破解供需矛盾的核心切入点。

### 3 讨论

目前,广东省为了实现节能减排和节水的目标,已将煤炭和大量中低端制造业转移至外部地区,并

从外部调入大量的电力资源、制造成品和粮食以维系地区经济的持续稳定发展,造成WEF直接使用量的减少和间接消耗量的增加。因此,应关注外部调入资源要素强度与本地资源要素强度的比较,由Hong等<sup>[36]</sup>的研究可知,广东省的水资源、能源利用效率相比于湖南、江西、广西等周边省份更高,即相比于广东省,周边省份生产同等价值的产品或服务时需要消耗更多的资源,外省对广东省产品或服务的供给将伴随着大量WEF间接资源消耗量的流入,而这部分间接资源消耗是地区资源管控中的不可控部分,可能引发“局部资源消耗降低,整体资源消耗增加”的尴尬局势,因此,WEF资源利用效率的提升不应仅局限于单一地区,更应从区域甚至全国视角出发考虑,从而实现资源消耗总量控制,这与Zhang等<sup>[37]</sup>的研究观点相符。

此外,广东省大力发展高端制造业,城市化进程不断加快,第三产业日益繁盛,WEF资源的直接使用量和间接使用量之间的差距也在逐步扩大,供给WEF资源的外部省份可能面临更大的资源压力,传统资源管理规范中仅限制资源的直接使用量远远不够,Liu等<sup>[38-39]</sup>对省份及城市尺度水资源和能源的完全消耗研究结果也验证了这一观点。因此,在相关政策的实施过程中,不仅要关注资源的供给端,更应从需求端的视角审视整个经济链中的资源消耗量,进而避免由于过度限制直接消耗而引起间接消耗不断扩张的现象发生。对于广东省经济系统各部门,在选择上游贸易伙伴时,应尽量选择资源强度较低的省份,从而降低资源消耗量;同时,应着重发展循环经济,支持鼓励扩大商品进口量,尤其是WEF综合利用效率较高的国家或地区产品的输入,充分利用有限的资源。同时,需要着重提高资源利用效率,实现资源利用强度和总量的双控。

值得注意的是,广东省粤东、粤西、粤北及珠江三角洲地区WEF资源禀赋条件差异较大,若需详细量化广东省区域内部差异,可以基于引力模型和列系数模型法,编制广东省多地区投入产出表,在此基础上进一步开展广东省内不同地区资源利用效率比较分析,以及压力互馈空间差异分析。

### 4 结论

- a. 2007—2017年广东省各部门的水资源、能源、粮食资源强度逐年下降,三者的年均下降率分别为7.98%、8.11%和8.23%。农业、水的生产和供应业等部门具有较高的水资源和粮食强度,矿业、电力及燃气的生产和供应业等部门具有较高的能源强度。
- b. 制造业是广东省WEF资源的主要吸纳者,



城镇居民消费和省外调出在广东省 WEF 资源最终消费中占据最大比例。广东省 WEF 资源净流入量逐年增加,2007—2017 年平均净流入量分别为 280.48 亿 m<sup>3</sup>、7.25×10<sup>19</sup>J、916.90 万 t,均超过本地资源生产量。

c. 研究期间,省际能源贸易缓解了广东省年均 84.33%的能源使用压力;粮食贸易缓解了广东省年均 40.13%的粮食使用压力,且作用程度呈逐年增加趋势。粮食贸易对广东省水资源压力的缓解作用显著强于对能源贸易的缓解作用,前者的作用效果可达后者的 5 倍。

## 参考文献:

[1] 李激,姜珊,赵勇,等. 京津冀水-能源-粮食耦合系统安全评价[J]. 水资源保护,2023,39(5):39-48. (LI Wei, JIANG Shan, ZHAO Yong, et al. Safety evaluation of water-energy-food coupling system in Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Water Resources Protection, 2023, 39(5):39-48. (in Chinese))

[2] 左其亭,吴青松,马军霞,等. “双碳”目标下水资源行为调控研究框架及展望[J]. 水资源保护,2023,39(1):8-14. (ZUO Qiting, WU Qingsong, MA Junxia, et al. Research framework and prospect of water resource behaviors regulation under carbon peak and carbon neutrality goals[J]. Water Resources Protection, 2023, 39(1):8-14. (in Chinese))

[3] 彭俊杰. 黄河流域“水-能源-粮食”纽带系统的生成机制、价值体现与路径重塑[J]. 当代经济管理,2021,43(8):76-81. (PENG Junjie. The generating mechanism, value embodiment and path reconstruction of the water-energy-food nexus in the Yellow River Basin [J]. Contemporary Economic Management, 2021, 43(8):76-81. (in Chinese))

[4] 姜珊,王建华,刘合,等. 黄河上中游地区水-粮食-能源协同发展策略研究[J]. 中国工程科学,2023,25(4):180-190. (JIANG Shan, WANG Jianhua, LIU He, et al. Coordinated development of water, food, and energy in upper and middle reaches of the Yellow River[J]. Strategic Study of CAE, 2023, 25(4):180-190. (in Chinese))

[5] 王红瑞,赵伟静,邓彩云,等. 水-能源-粮食纽带关系若干问题解析[J]. 自然资源学报,2022,37(2):307-319. (WANG Hongrui, ZHAO Weijing, DENG Caiyun, et al. Analysis on issues of water-energy-food nexus[J]. Journal of Natural Resources, 2022, 37(2):307-319. (in Chinese))

[6] 许紫月,马凯,袁旭,等. 跨境流域水-能源-粮食关联关系研究进展与展望[J]. 地理科学,2023,43(8):1442-1450. (XU Ziyue, MA Kai, YUAN Xu, et al. Progress and prospect of water-energy-food nexus in the

transboundary river basins [J]. Scientia Geographica Sinica, 2023, 43(8):1442-1450. (in Chinese))

[7] LIU S Y, ZHANG J J, HAN M Y, et al. Multi-scale water use balance for a typical coastal city in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 236(1):117505.

[8] TIAN Z Z, FANG D L, CHEN B. Three-scale input-output analysis for energy and water consumption in urban agglomeration[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 268:112148.

[9] WU X F, CHEN G Q. Energy use by Chinese economy: a systems cross-scale input-output analysis [J]. Energy Policy, 2017, 108(c):81-90.

[10] GUO S, LI Y L, HE P, et al. Embodied energy use of China's megacities: a comparative study of Beijing and Shanghai[J]. Energy Policy, 2021, 155:112243.

[11] ZHANG J B, LIU L R, XIE Y L, et al. An integrated optimization and multi-scale input-output model for interaction mechanism analysis of energy-economic-environmental policy in a typical fossil-energy-dependent region[J]. Energy Strategy Reviews, 2022, 44:100947.

[12] ZHANG P, CAI Y P, ZHOU Y, et al. Quantifying the water-energy-food nexus in Guangdong, Hong Kong, and Macao regions [J]. Sustainable Production and Consumption, 2022, 29:188-200.

[13] XIAO Z Y, YAO M Q, TANG X T, et al. Identifying critical supply chains: an input-output analysis for food-energy-water nexus in China[J]. Ecological Modelling, 2019, 392(24):31-37.

[14] 曹涛,王赛鸽,陈彬. 基于多区域投入产出分析的京津冀地区虚拟水核算[J]. 生态学报,2018,38(3):788-799. (CAO Tao, WANG Saige, CHEN Bin. Virtual water analysis for the Jing-Jin-Ji Region based on multiregional input output model [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(3):788-799. (in Chinese))

[15] 陈荟荟. 中国隐含能流通网络核算及影响因素分析[D]. 兰州:兰州财经大学,2024.

[16] OKI T, KANAE S. Global hydrological cycles and world water resources[J]. Science, 2006, 313:1068-1072.

[17] 孙才志,张佳亮. 中国与“一带一路”沿线国家农产品贸易的水资源压力效应[J]. 水利水电科技进展,2023,43(4):1-8. (SUN Caizhi, ZHANG Jialiang. Effects of water resources stress on agricultural trade between China and countries along Belt and Road [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43(4):1-8. (in Chinese))

[18] FUENTES-CORTÉS L F, RODRIGUEZ-GUTIÉRREZ J E, LOPEZ-RAMÍREZ M D, et al. Involving energy security and a water-energy-environment nexus framework in the optimal integration of rural water-energy supply systems [J]. Energy Conversion and Management, 2023, 293:117452.

- [19] 孙建文. 国际贸易视角下中国粮食安全影响因素研究[D]. 南昌:江西财经大学,2020.
- [20] 陈军飞,陈琳,刘黎明,等. 基于PSR-CGPM的区域“水资源-能源-粮食”系统安全评价研究[C]//2019年中国软科学文集.北京:中国软科学研究会,2020:127-137.
- [21] 欧阳怡然. 珠三角城市群水-能源-粮食-经济协调性时空演变分析[D]. 广州:广东工业大学,2021.
- [22] 孙才志,郝帅,赵良仕. 中国水资源-能源-粮食纽带系统效率时空分异特征[J]. 水资源保护,2021,37(1):61-68. (SUN Caizhi, HAO Shuai, ZHAO Liangshi. Spatial-temporal differentiation characteristics of water resources-energy-food nexus system efficiency in China [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(1): 61-68. (in Chinese))
- [23] 王红瑞,王洪冲,赵伟静,等. 长江经济带水-能-粮流通及压力变化特征分析[J]. 人民长江,2023,54(5):2-11. (WANG Hongrui, WANG Hongchong, ZHAO Weijing, et al. Analysis on characteristics of water-energy-food circulation and pressure changes in the Changjiang River Economic Belt [J]. Yangtze River, 2023,54(5):2-11. (in Chinese))
- [24] 张中浩,孙诗萌,高峻. 长三角城市群水-能源-粮食系统压力的演变特征及其影响机制[J]. 自然资源学报,2022,37(6):1586-1597. (ZHANG Zhonghao, SUN Shimeng, GAO Jun. Evolution characteristic and influencing mechanism of water-energy-food stress in Yangtze River Delta urban agglomeration [J]. Journal of Natural Resources, 2022, 37(6): 1586-1597. (in Chinese))
- [25] DENG C Y, WANG H R, GONG S X, et al. Effects of urbanization on food-energy-water systems in mega-urban regions: a case study of the Bohai MUR, China [J]. Environmental Research Letters, 2020, 15(4): 044014.
- [26] 白景锋,张海军. 中国水-能源-粮食压力时空变动及驱动力分析[J]. 地理科学,2018,38(10):1653-1660. (BAI Jingfeng, ZHANG Haijun. Spatio-temporal variation and driving force of water-energy-food pressure in China [J]. Scientia Geographica Sinica, 2018, 38(10): 1653-1660. (in Chinese))
- [27] 陈文龙,马志鹏,袁菲,等. 粤港澳大湾区水安全协同调控理论框架研究[J]. 水资源保护,2023,39(1):22-31. (CHEN Wenlong, MA Zhipeng, YUAN Fei, et al. Theoretical framework of water security collaborative regulation and control in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(1): 22-31. (in Chinese))
- [28] 张鹏飞,徐静怡,郭巍,等. 粤港澳大湾区电力系统低碳转型[J]. 上海交通大学学报,2022,56(3):293-302. (ZHANG Pengfei, XU Jingyi, GUO Wei, et al. Low carbon transformation of the power system in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2022, 56(3): 293-302. (in Chinese))
- [29] 洪思扬,王红瑞,程涛,等. 国际及省际贸易视角下的中国虚拟水和隐含能源流通规律分析[J]. 地理科学,2022,42(10):1735-1746. (HONG Siyang, WANG Hongrui, CHENG Tao, et al. Circulation characteristics of virtual water and embodied energy in China from the perspective of international and inter-provincial trade [J]. Scientia Geographica Sinica, 2022, 42(10): 1735-1746. (in Chinese))
- [30] 洪思扬,王红瑞,梁俊芬,等. 京津冀地区水-能源利用效率与资源压力核算[J]. 水资源保护,2021,37(5):102-111. (HONG Siyang, WANG Hongrui, LIANG Junfen, et al. Calculation of energy-water utilization efficiency and resource pressure in Beijing-Tianjin-Hebei Region [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(5): 102-111. (in Chinese))
- [31] 姜珊. 水-能源纽带关系解析与耦合模拟[D]. 北京:中国水利水电科学研究院,2017.
- [32] 孙世坤,王玉宝,刘静,等. 中国主要粮食作物的生产水足迹量化及评价[J]. 水利学报,2016,47(9):1115-1124. (SUN Shikun, WANG Yubao, LIU Jing, et al. Quantification and evaluation of water footprint of major grain crops in China [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(9): 1115-1124. (in Chinese))
- [33] 朱永昶. 土地规模化经营对农业减缓和适应气候变化的影响研究[D]. 北京:中国农业科学院,2018.
- [34] 贺仁飞. 中国生物质能的地区分布及开发利用评价[D]. 兰州:兰州大学,2013.
- [35] VÖRÖSMARTY C J, GREEN P, SALISBURY J, et al. Global water resources: vulnerability from climate change and population growth [J]. Science, 2000, 289: 284-288.
- [36] HONG S Y, YANG H, WANG H R, et al. Water and energy circulation characteristics and their impacts on water stress at the provincial level in China [J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2021, 35: 147-164.
- [37] ZHANG P, ZHOU Y, XIE Y L, et al. Assessment of the water-energy-food nexus under spatial and social complexities: a case study of Guangdong-Hong Kong-Macao [J]. Journal of Environmental Management, 2021, 299: 113664.
- [38] LIU S, WU X, HAN M, et al. A three-scale input-output analysis of water use in a regional economy: Hebei Province in China [J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 156: 962-974.
- [39] LI J S, XIA X H, CHEN G Q, et al. Optimal embodied energy abatement strategy for Beijing economy: based on a three-scale input-output analysis [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 53: 1602-1610.